

安定同位体および化学データによる富山県 常願寺川扇状地地下水のかん養源の同定

水谷 義彦・桜井 和浩

IDENTIFICATION OF RECHARGE SOURCES OF GROUNDWATER IN THE JOGANJIGAWA FAN, TOYAMA, USING ISOTOPIC AND CHEMICAL DATA

By Yoshihiko MISUTANI and Kazuhiro SAKURAI

Synopsis

The Joganjigawa Fan, an area of rice farming of 50 km², lies to the southeast of Toyama city and was formed in the Late Quarternary by terrestrial gravel deposition by the Joganji River. To identify sources of water in shallow aquifers (maximum depth 100 m) beneath the fan, studies of hydrogen and oxygen isotopes in the ground and surface waters of the fan have been made. Major rivers flowing onto the fan are from higher-altitude catchments (maximum altitude 3000 m) and have lower δD and $\delta^{18}O$ values than rainfall on the fan. The isotopic measurements indicate that the aquifers are mainly recharged by infiltration of the irrigation water, which is derived from the Joganji River, and local precipitations from the surface. In narrow areas along the Jinzu and its tributary the Kumano Rivers, the aquifers are locally recharged from the Jinzu and Kumano Rivers, respectively. Chemical data support this identification of sources of water in the aquifers.

1. はじめに

富山平野は古くから地下水の豊富な地域であり、その地下水は生活用水として広く利用されてきた。しかし、近年、富山市を中心とする各種工業活動の発展に伴い地下水使用量が増大したため、富山平野全般にわたって地下水位が低下している。また、五六豪雪以後は、富山市の中心部において道路の融雪用として揚水される地下水の量が増加しており、冬に水の枯れる井戸が増加している。そのため、地下水利用者から資源の保護と利用の適正化が強く望まれている。

本研究では、常願寺川扇状地およびその周辺の降水、河川水および地下水について、水素および酸素安定同位体比 (D/H および $^{18}O/^{16}O$) の測定と溶存化学成分の分析を行い、それらの結果から、同扇状地の地下水のかん養源の同定を行なった。

2. 常願寺川扇状地の概要

常願寺川扇状地は富山平野の南部に発達する典型的な扇状地である (Fig. 1)。この扇状地の地下水は

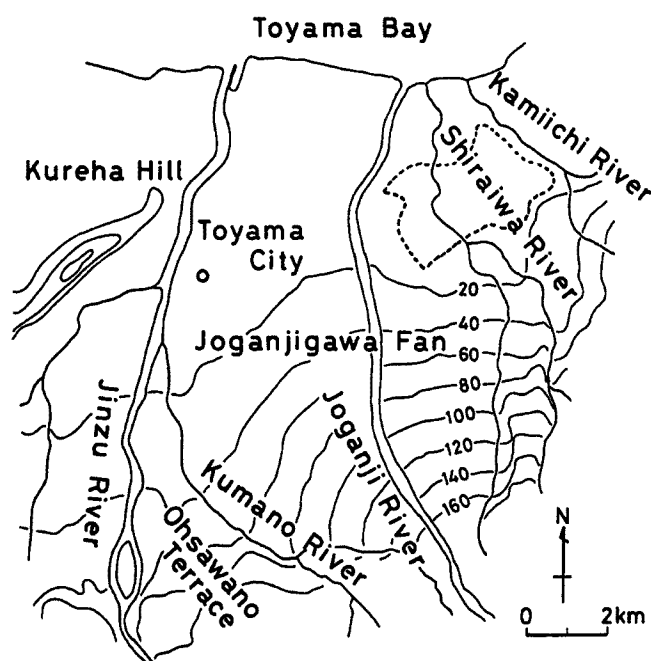


Fig. 1. Map of the Joganjigawa Fan, Toyama.

Broken line: confined aquifer.

深井¹⁾によれば、その表流水の一部は扇頂部およびその下流部で扇状地へ伏流している。また、常願寺川の水は扇頂部付近から放射状に作られた用水路に分水されており、扇状地のほぼ全域の水田をかんがいしている。そして、それらの用水路の主なものは、常願寺川右岸の扇状地では白岩川に、常願寺川左岸では神通川に、それぞれ扇端部において合流している。また、扇状地の南側の段丘崖に沿って熊野川が流れている。この川は神通川扇状地との間を流れて神通川に合流している。

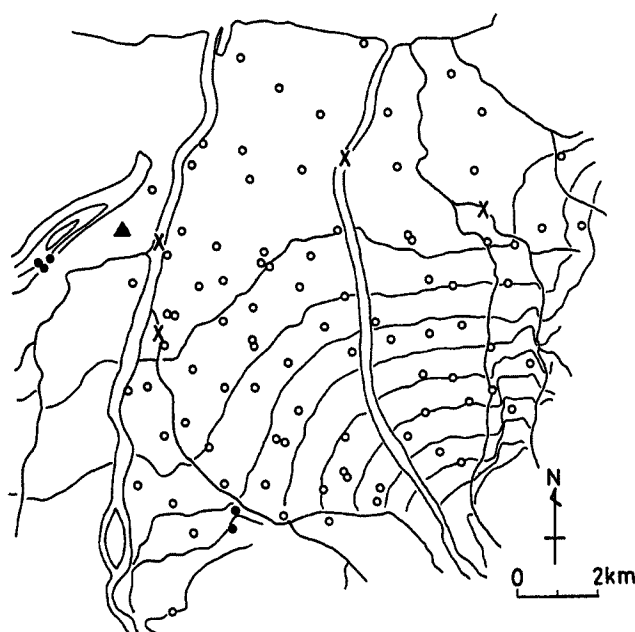


Fig. 2. Map showing sampling sites.

○: groundwater, ●: groundwater recharged by precipitation alone, ×: river water, and ▲: precipitation.

沖積層、洪積層と重なっており、その下の基盤は第三紀層である。基盤は盆状に凹んでおり、その深度は常願寺川沿いの扇端部付近で 400 m に達する。沖積層は透水性の良い砂れき層からなり、地下水は主に自由地下水として流れている。しかし、標高 20 m 前後の扇端部と海岸の間に広がる地域では、表層付近および深度 70 ~ 120 m に粘土・砂泥互層が発達しており、不透水層を形成している。そのため、かつては被圧地下水が広く存在し、数多くの自噴井が利用されていたが、現在では、それらの自噴井は主に常願寺川右岸地域に残っているにすぎない。地下水位は、一般に河川の豊水期である春と秋に高く、渇水期である夏と冬に低下する。

扇状地の中央を流れる常願寺川は、

3. 試料採取

降水、河川水および地下水の試料を採取した地点を Fig. 2 に示す。

降水の試料は、扇端部に近い富山大学理学部の屋上において 1981 年 5 月以降、一ヶ月分ずつ集められており、それらの試料の水素および酸素同位体比測定結果の一部は、佐竹ら²⁾によって報告されている。

河川水の試料は、常願寺川、神通川、白岩川および熊野川において、1986 年 6 月から 12 月までの期間、毎月一回、2 ~ 3 日前から大量の降水のない

時を選んで採取した。なお、常願寺川と神通川については、1980年4月から1983年3月までの期間に、上記の試料採取地点と同一地点において毎月一回採取した表流水試料の水素および酸素同位体比の測定結果が既に報告されている³⁾。

地下水の試料は、1986年7月および8月に常願寺川扇状地およびその周辺の83地点の浅井戸（深度＜100 m）から採取した。また、地形からみて降水だけをかん養源としていると判断される地下水として、それぞれ常願寺川扇状地の西および南側に位置する呉羽丘陵および大沢野台地の麓から、浅井戸の水および湧水を採取した。

4. 安定同位体比の測定と化学分析

水のD/H比は、試料水を650℃に加熱した金属ウランによって水素ガスに還元した後、得られた水素ガスのD/H比を質量分析法で測定した⁴⁾。また、 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比は、試料水を二酸化炭素と25℃で同位体交換平衡にした後⁵⁾、その二酸化炭素の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を質量分析法で測定した。この場合、二酸化炭素の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比は水の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比から一定のへだたりを持っているので、得られた測定値から試料水の $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比を求めることができる。試料水のD/Hおよび $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 比は標準平均海水（SMOW）からの千分偏差（ δ 値）で示す：

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_{\text{試料}} - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \right) \times 1000 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 $R = \text{D}/\text{H}$ 、または $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、測定精度は、 δD の場合に $\pm 1\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ については $\pm 0.1\text{‰}$ である。

溶存化学成分の分析は、主要陰イオンである塩化物イオン、硫酸イオンおよび重炭酸イオンについて、それぞれ、チオシアン酸水銀比色法、トリウムーモリン比色法およびアルカリ度滴定法によって行なった⁶⁾。

5. 結果および考察

天然水は、一般に、起源または経歴が異なれば、異なる δD および $\delta^{18}\text{O}$ を持っている。したがって、常願寺川扇状地において地下水のかん養源を同定するためには、まず、地下水の主なかん養源と思われる降水および河川水の δD と $\delta^{18}\text{O}$ について、それぞれの特徴を明らかにしておく必要がある。

Fig. 3は、降水について1981年5月から1985年4月までの期間の δD と $\delta^{18}\text{O}$ との関係を示したものである。降水の δD および $\delta^{18}\text{O}$ は、春から秋にかけては $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$ 、冬は $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 30$ の直線に沿って大きく変動している。このことは、夏期と冬期では、降水をもたらす気団への水蒸気の供給条件が大きく異なることを

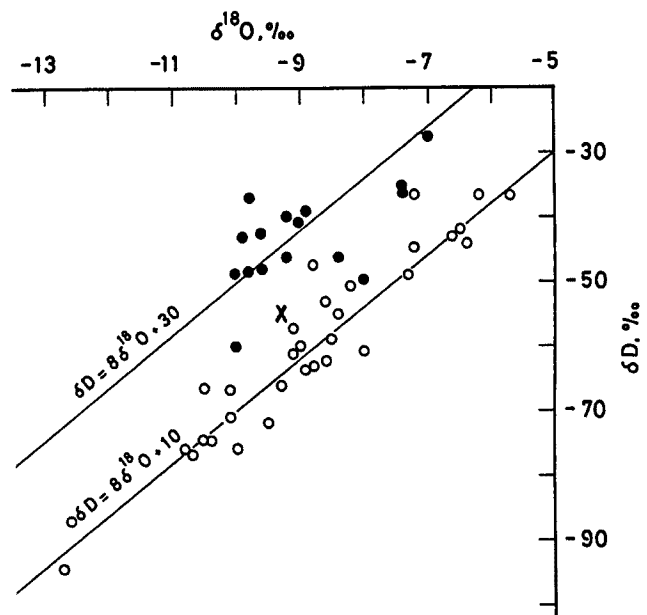


Fig. 3. Plot of δD versus $\delta^{18}\text{O}$ for monthly precipitation collected at Toyama University during May, 1981–Apr., 1985. ○: Mar. –Oct. ●: Nov. –Fed. and ×: mean weighted with precipitation.

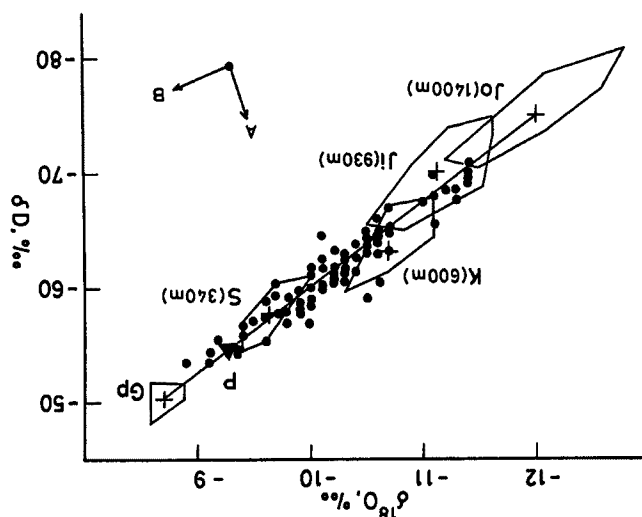


Fig. 4. Plot of δD versus $\delta^{18}O$ for ground and river waters from the Joganjigawa Fan. Jo: Joganji river water during Apr., 1980 - Mar., 1983 and Jun. - Dec., 1986, Ji: Jinzu river water during Apr., 1980 - Mar., 1983 and Jun. - Dec., 1986, K: Kumano river water during Jun. - Dec., 1986, S: Shiraiwa river water during Jun. - Dec., 1986, P: precipitation, Gp: groundwater recharged by precipitation alone, +: mean, and (): mean altitude of catchment area. The arrow shows the isotopic variation trend of groundwater: A=transpiration (loss of summer precipitation without isotopic fractionation) and B=evaporation with non-equilibrium isotopic fractionation.

示している。このような季節変動の型は、地球上の他の多くの場所におけるものとは著しく異なっており、北陸地方に特有のものである²⁾。一般に地下水の δD および $\delta^{18}O$ は、その地域の降水の δD および $\delta^{18}O$ の年平均値に等しいと言われているので、Fig. 3に上記の期間の平均値を示した。

次に、Fig. 4に河川水と地下水における δD と $\delta^{18}O$ の関係を示す。河川水の δD および $\delta^{18}O$ は、降水に見られるような大きな季節変動を示していない点に特徴がある。このことは、降水が地下を経て河川へ流出する過程で十分混合され、季節変動が打ち消されていることを示している。また、各河川はそれぞれ異なる δD および $\delta^{18}O$ を持っているが、それらは勾配8の方向に変化しており、しかも、その変化は流域の平均高度に依存している。このことは、これらの河川の流域内の降水の δD および $\delta^{18}O$ が高度効果を受けていることを示す³⁾。扇状地周辺の降水だけをかん養源としている地下水および湧水の δD および $\delta^{18}O$ は降水の平均値(1981年5月～1985年4月)と一致していない。この不一致は、夏期の降水のかなりの部分が蒸発散によって失われること、そして特に灌漑期の水田などに入った降水は、地下に浸透する前に、激しい蒸発を受けることによるものと考えられる。蒸散の場合は、降水は毛細管を通して失われるため同位体の分別はほとんど起こらない。従って、この場合、地下に浸透した降水(地下水)の年平均値は単純に冬期の降水側にずれることになる(Fig. 4, 矢印A)。しかし、水田における蒸発のような場合は、解放系における蒸発であるため、勾配4の方向へのDおよび ^{18}O の濃縮を生じる(Fig. 4, 矢印B)^{7), 8)}。Fig. 4に示された。降水だけをかん養源とする地下水および湧水の値と降水の平均値との違いから、常願寺川扇状地およびその周辺の降水は地下へ浸透する過程で、蒸散により夏期の降水を失う以外に、蒸発によるDおよび ^{18}O の濃縮をかなり受けっていると判断される。しかも、これらの降水起源の地下水および湧水を採取した丘陵および台地は主に雑木林に覆われているが、常願寺川扇状地は表面を水田に覆われているので、同扇状地の降水起源の地下水は蒸発によるDおよび ^{18}O の濃縮をより大きく受けてい

る可能性がある。

扇状地の地下水は、Fig. 4において、降水だけをかん養源とする地下水および湧水と河川水を結ぶ直線に沿って分布している。このことは、これらの地下水が降水起源の地下水と常願寺川または神通川、熊野川の水との混合水であることを示している。そして、この混合線から、各地下水試料における降水起源の地下水と河川水の混合率を見積もることができる：

$$\delta_g = \delta_p \times F_p + \delta_r \times F_r \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $F_p + F_r = 1$ 、 g 、 p および r は、それぞれ、扇状地地下水、降水起源の地下水および河川水を表わし、 F は扇状地地下水中のそれぞれの成分の割合である。なお、各地下水試料中の河川水成分がどの河川からの浸透水であるかは、試料採取地点と各河川の位置関係および地下水の δD または $\delta^{18}O$ の地理的分布と各河川の δD および $\delta^{18}O$ との比較から判断することができる。Fig. 5に地下水の δD の地理的分布を示す。この地図から、

神通川右岸の狭い地域（主に神通川扇状地）および熊野川沿いの地域には、それぞれ、神通川および熊野川からの伏流水の影響が認められる。また、常願寺川の伏流水の影響は、扇状地の常願寺川左岸の下流部に認めることができる。上市川上流部の δD がやや高い地域は、上市川扇状地であり、上市川からの伏流水によってかん養されている地域である。残りの大部分の地域では、 δD および $\delta^{18}O$ は比較的一様な値を示しており、降水と河川水（常願寺川起源）がよく混合されていることを示唆している。このことから、この地域では常願寺川の水の大部分は用水路および水田を経由して地表から浸透していると推定される。

以上の考察に対して、溶存化学成分に関するデータから検討を加えることができる。

Fig. 6に各水試料における塩化物イオン濃度と $\delta^{18}O$ との関係を示す。富山地方の環境水中の溶存塩化物は、温泉および人間が影響している場合を除けば、大部分は冬に季節風によって日本海から運ばれる海塩に由来する²⁾。しかし、一般に海塩粒子は粗粒なため大部分が海岸近くに落下するので、海岸から離れた高地などの降水は、海岸に近い平野部の降水に比べて明らかに低い塩化物イオン濃度を示す。そのため、Fig. 6において、見掛上は降水の δD および $\delta^{18}O$ に対する高度効果と同じ効果を、降水および河川水の塩化物イオン濃度に認めることができる。一方、降水起源の地下水には、蒸発散による塩化物イオンの濃縮が認められる。そして、扇状地の地下水については、Fig. 4で見られた直線関係と同様の関係が見られる。この場合、 $\delta D - \delta^{18}O$ 関係（Fig. 4）に比べて直線性が劣るのは、富山市周辺の地下水に人間活動による塩化物の付加が行なわれているためである。Fig. 7に地下水の塩化物濃度の地理的分布を示す。この図から、富山市中心部の地下水の塩化物イオン濃度が比較的高いこと、そして扇状地の地下水の塩化物イオン濃度が一様であることを認めることができる。また、河川からの伏流水の存在を示すような低濃度地域は、 δD および $\delta^{18}O$ から認められた地域以外には見当たらない。

Fig. 8に地下水の硫酸イオン濃度の地理的分布を示す。富山平野の降水は、通常、数ppm以下の硫酸イオンを含んでいる（水谷：未発表）。一般に降水中の硫酸イオンの大部分は、化石燃料の燃焼により大気中に放出された二酸化硫黄の酸化によって生じたものである。一方、常願寺川などの河川水は10ppm



Fig. 5. Map showing δD values of groundwater in the Joganjigawa Fan.

前後の比較的高い硫酸イオン濃度を示している。これは各河川の流域に噴気地帯（常願寺川）および硫化物鉱床（神通川、熊野川）などの硫酸イオン供給源が存在するためである。扇状地の地下水は、このような河川水と降水の混合物であるので、その硫酸イオン濃度は、河川水の値よりも低いはずであるが、実際には河川水と同等またはそれ以上の高い値を示している。このことは、扇状地の水田で使われている硫酸などの化学肥料に由来する硫酸イオンの付加⁹⁾を示唆していると同時に、水田からの浸透水が地下水をかん養していることを裏付けている。

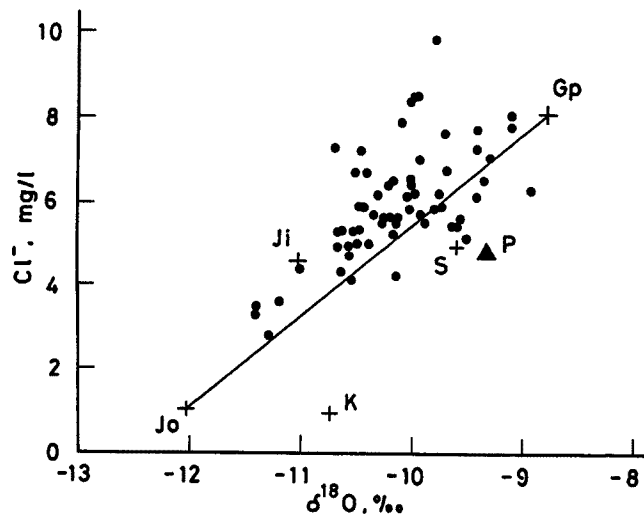


Fig. 6. Plot of $\delta^{18}\text{O}$ versus chloride content for Joganjigawa Fan water samples. The symbols are the same as given in Fig. 4.

Fig. 9 に地下水の重炭酸イオン濃度の地理的分布を示す。地下水中の重炭酸イオンは、堆積物中の有機物の分解による二酸化炭素の生成と、それによる岩石風化によって僅かずつ地下水に付加される。従って、地下水の重炭酸イオン濃度は、地下水の地下滞留時間の長さを或程度反映している。図から、扇状地地下水の重炭酸イオン濃度は扇状地内では比較的一様であるが、扇端部、特に富山市中心部では高いことが分かる。富山市中心部の地下水が、扇状地の地下水に比べて、かなり長い地下滞留時間を持っていることは、トリチウムのデータから明らかにされている（水谷：未発表）。地形から見て、

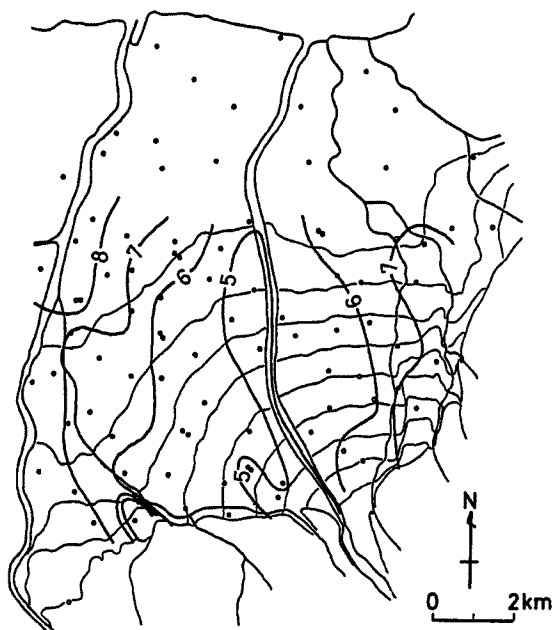


Fig. 7. Map showing chloride contents (ppm) of groundwater in the Joganjigawa Fan.

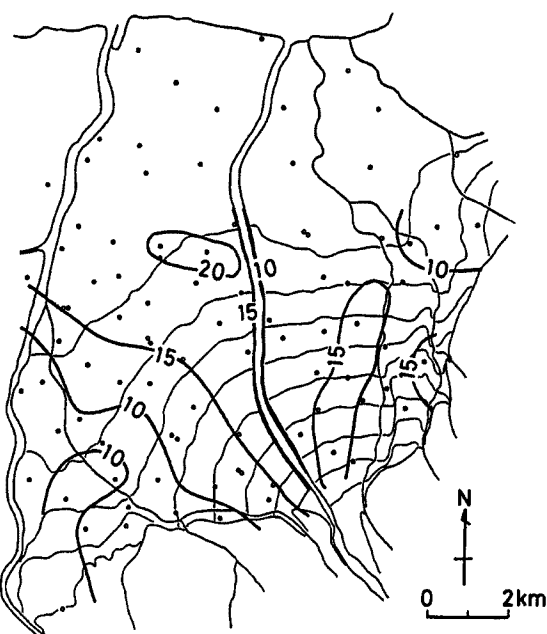


Fig. 8. Map showing sulfate contents (ppm) of groundwater in the Joganjigawa Fan.

富山市中心部には扇状地の地下水, 熊野川および神通川からの伏流水が流れ込んでいる可能性が高い。布村¹⁰⁾は1961年に地下水調査を行ない, 比抵抗および溶存化学成分のデータから, 神通川の伏流水が富山市中心部の西部に認められると報告している。本研究では, そのような伏流水の存在を示す明確な δD , $\delta^{18}O$ および溶存化学成分濃度の違いを認めることができなかったが, それは, 最近の地下水利用の増加により, 富山市中心部で地下水の混合が行なわれるようになったためと考えられる。

以上に述べた δD , $\delta^{18}O$ および溶存化学成分濃度の地域による違いをもとに, 地形を考慮しながら決め

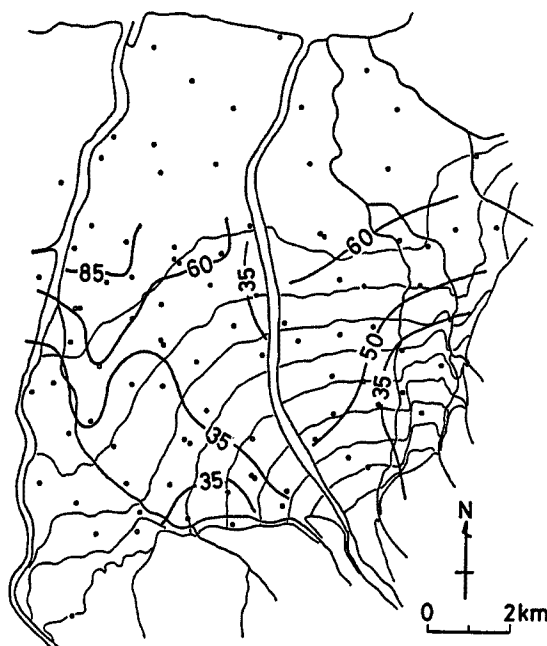


Fig. 9. Map showing bicarbonate contents (ppm) of ground water in the Joganjigawa Fan.

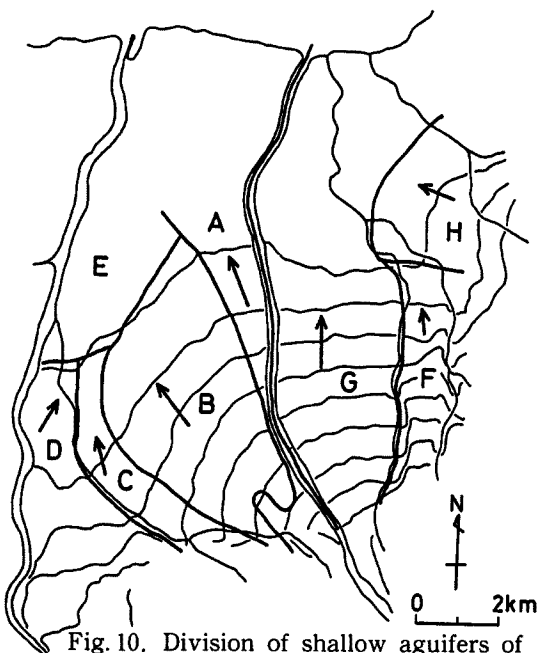


Fig. 10. Division of shallow aguifers of the Joganjigawa Fan in terms of isotopic and chemical compositions of groundwater and the topography of the fan.

Table 1. Recharge sources of groundwaters in the Joganjigawa Fan.

Aquifer*	Sources of water** and their contribution
A	Infiltration from the Joganji River (>60%) and ppt. (<40%)
B	Irrigation from the Joganji River (40-50%) and ppt. (60-50%)
C	Infiltration from the Kumano River (<70%) and ppt. (>30%)
D	Infiltration from the Jinzu River (40-70%) and ppt. (60-30%)
E	Intermixing of waters from B, C and D
F	Precipitation (100%)
G	Irrigation from the Joganji River (40-60%) and ppt. (60-40%)
H	Kamiichigawa Fan groundwater

*: the same as given in Fig. 10.

**: ppt.=precipitation.

た扇状地およびその周辺の地下水の水系区分を **Fig. 10** に示す。また、**Table 1** に各地下水系のかん養源および (2) 式から求めた各かん養源の寄与の割合を示す。

6. お わ り に

水素および酸素安定同位体および溶存陰イオンを指標として、常願寺川扇状地浅層地下水について、かん養源の同定および水系区分を行った。その結果、同扇状地の地下水は主に常願寺川の水と扇状地の降水によってかん養されていること、そして、その混合比は扇状地の大部分の地域において、1:1前後であることが明らかにされた。また、常願寺川の水は主に用水路を経由して水田などから地下へ浸透しており、従来から重要視されてきた扇頂部からの伏流水の寄与は、わずかであることが示された。

今後、これからの知見を富山平野の地下水の資源保護と適正利用のための基礎データとして、さらに有効なものとするためには、常願寺川扇状地の扇端部から海岸にかけて広がる地域の浅層地下水（第一帯水層：深度<100 m）および、最近、富山市内で急速に揚水量が増加している深層地下水（第二帯水層：深度>100 m）のかん養源の同定および流動状況の詳細を明らかにする必要がある。

参 考 文 献

- 1) 深井三郎：とやまの水，北日本新聞社，1985，pp.230-238.
- 2) 佐竹 洋・向井利明・水谷義彦：D, T, ^{18}O から見た北陸地方の降水と河川水の水文学的特徴，富山大学トリチウム科学センター研究報告，第3巻，1984，pp.45-56.
- 3) 水谷義彦：水文学に望まれる諸問題—安定同位体水文学—，ハイドロロジー，第16巻，1986，pp.74-82.
- 4) Bigeleisen, L., Perlman, M. L. and Prosser, H. C.: Conversion of hydrogenic materials to hydrogen for isotopic analysis, Anal. Chem., Vol. 24, 1952, pp.1356-1357.
- 5) Yoshida, N. and Mizutani, Y.: Preparation of carbon dioxide for oxygen-18 determination of water by use of a plastic syringe, Anal. Chem., Vol. 58, 1986, pp.1273-1275.
- 6) 日本分析化学会北海道支部編：水の分析（第3版），化学同人，1981，pp.173-186.
- 7) Sakai, H. and Matsubaya, O.: Stable isotopic studies of Japanese geothermal systems, Geothermics, Vol. 5, 1977, pp.97-124.
- 8) 松葉谷 治・越中 浩：雄物川水系の河川水の水素及び酸素同位体比，秋田大学鉱山学部資源地学研究施設報告，第25巻，1987，pp.15-23.
- 9) 杉崎隆一・杉浦 孜：地下水質と地下水の流動機構，日本河川協会編，日本河川水質年鑑，1979，pp.885-897.
- 10) 布村啓一：富山市地下水の化学的研究（その1）化学成分の分布状態，富山高等専門学校紀要，第2巻，1968，pp.19-23.